

基于盒子维数和最大Lyapunov维数的瞬态信号特征提取

颜富甲, 黄联芬, 赵彩丹

(厦门大学 信息科学与技术学院 通信工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 认知无线电是一种通过无线频谱感知来有效提高频谱利用率的无线通信技术。它除了面临传统无线通信的各种安全问题外,还会面临一些新的问题,比如模仿主用户攻击(PUE)。提出基于分形维数的瞬态信号特征提取来预防认知无线网络中的模仿主用户攻击,并通过实验提取无线发射机的分形维数,为下一步信号识别提供可靠的特征参数,达到预防PUE攻击的目的。

关键词: 认知无线电; 模仿主用户攻击; 盒子维数; 最大Lyapunov维数; 特征提取

中图分类号: TN918.91-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2013)07-0051-03

Transient signal feature extraction based on box dimension and maximum Lyapunov dimension

YAN Fu-jia, HUANG Lian-fen, ZHAO Cai-dan

(Department of Communication Engineering, Information Science and Technology College, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Cognitive radio is one kind of wireless communication technology, which effectively improves the spectrum efficiency by the way of wireless spectrum sensing. Besides of varieties of security issues of the traditional wireless communication, it also has some new problems, such as Primary User Emulation (PUE) attack. This paper proposes that the transient signal characteristics extraction based on the fractal dimension protects the PUE attack from the cognitive wireless networks, and then extracts the fractal dimension of wireless transmitter through experiments, which provides reliable characteristic parameters for the next signal recognition to prevent the attack of PUE.

Keywords: cognitive radio; primary user emulation attack; box dimension; maximum Lyapunov dimension; feature extraction

0 引言

认知无线网络是在软件无线电基础上发展起来的新兴通信网,它以一种“机会方式”接入授权频段内,动态地利用其临时空闲的频段,从而提高其频谱利用率^[1]。在认知无线电中,一个被授予执照的用户称为主用户(Primary User, PU),而没有被授予执照的用户称为认知用户。无线频谱感知是认知无线电的关键技术之一,它的目的就是找到当前无线频谱中未被主用户利用的频谱空穴,即检测主用户信号的存在性,它是认知无线电得以正常工作的前提保证^[2]。从1999年瑞典皇家工学院的Mitola J.博士首先提出认知无线电概念^[3]以来,认

知无线电受到了广泛的关注并取得了显著的发展。

认知无线电作为无线通信的一种,除了会面临传统无线通信的各种安全问题外,还会面临一些新的安全隐患,比如模仿主用户攻击(Primary User Emulation, PUE)等。模仿主用户攻击是利用在授权频段内发送一个模仿主用户的信号,来欺骗认知用户,从而阻止认知用户接入到这一频段内,达到非法占有频谱资源的目的。模仿主用户攻击不但严重干扰了认知用户的频谱感知过程,而且严重降低了认知用户的可用的频谱资源^[4]。本文引入特定发射机识别(Specific Emitter Identification, SEI)的概念,用于认知网络中非合作式设备的识别,达到预防PUE攻击的目的。SEI的研究主要有本振相位噪声提取、瞬态信号“指纹”识别、循环谱的特征提取、时钟指纹的提取等,本文主要从瞬态信号“指纹”识别展开,瞬态信号“指纹”识别是指发射机从静态到开机时,会经历一个瞬态过程,瞬态信号的特征是每个发射机特

收稿日期:2012-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助(61172097);福建省自然科学基金资助(2012J01424)

有的,对这些特征,如幅度、相位进行分析和提取,从而作为主用户发射机“指纹”识别的依据。本文提出一种基于分形理论的瞬态信号“指纹”特征提取,作为主用户发射机识别的依据。

1 分形理论及分形维数

分形理论是由 B.B.Mandelbort 于 1967 年首先提出,用以描述自然界不规则以及杂乱无章的事物和现象。自然界中存在许许多多具有分形特征的物体,比如海岸线、闪电的形状、大脑的褶皱、雪花的形状等等,这些分形物体有一个共同的特点就是局部与整体具有自相似性。分形的主要研究工具是它的维数,分形物体的维数可以由分形维数来描述,分形维数定量地表述了分形物体的形状和复杂性。目前有各种分形维数的定义方法,如 Hausdorff 维数、信息维数、容量维数等,本文主要针对盒子维数^[5]和最大 Lyapunov 维数来展开,对认知无线电信号提取其盒子维数和最大 Lyapunov 维数来作为识别的依据。

设 $A \in R_n$, 在欧氏距离下,用 $N(\delta, A)$ 表示覆盖集合 A 所需直径最大为 δ 的集的最少数目,则盒维数定义为^[6]:

$$D_B = \lim_{\delta \rightarrow 0} - \frac{\ln N(\delta, A)}{\ln \delta} \tag{1}$$

式中 D_B 即为集合 A 的盒子维数。盒子维数非常容易由计算机求得,因此它是到目前为止应用最为普遍的分形维数,广泛应用在各个学科领域中。

本文是基于 Wolf 方法^[7]来计算最大 Lyapunov 维数,而 Wolf 方法是基于相空间重构的^[8],在相空间重构的过程中,最重要的就是确定延迟时间 τ 和嵌入维数 m ,它们的选择直接关系到相空间重构的质量。采用一种基于关联积分的简单算法来同时估计延迟时间和嵌入维数,这种方法由 H.S.Kim 等人改进,称为 C-C 算法^[9-10]。Wolf 方法首先利用时间延迟法对瞬态信号时间序列 $x(t)$ 进行相空间重构,由 C-C 算法确定延迟时间 τ 和嵌入维数 m ,则空间中的每个点是由 $\{x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)\}$ 给出。找出距离初始点 $\{x(t_0), x(t_0+\tau), \dots, x(t_0+(m-1)\tau)\}$ 最近的点,用 $L(t_0)$ 标识这两点之间的距离。到 t_1 时刻, $L(t_0)$ 的值演化为 $L'(t_1)$,然后再按照与演化后基准点的距离 $L(t_1)$ 很小并且 $L(t_1)$ 与 $L'(t_1)$ 的夹角很小的原则寻找新的数据点。如此往复,直到穷尽所有的数据点。这样得出最大 Lyapunov 维数指数^[11] λ_1 为:

$$\lambda_1 = \frac{1}{t_p - t_0} \sum_{k=1}^p \log_2 \frac{L'(t_k)}{L(t_k - 1)} \tag{2}$$

式中 p 为演化的总次数。当 λ_1 趋向于稳定时,则最大 Lyapunov 维数计算成功。

2 实验及结果分析

针对 WLAN 网络,建立如图 1 所示的信号采集系统。将两张 USB 无线网卡分别安装在 PC1 和 PC2 上用于收发 802.11b 无线信号(信号码元速率为 11 Mb/s),两台 PC 间距离约有 5 m,当两张网卡成功建立无线链路并进行信号收发时,示波器依靠外接一个 2.4 GHz 的全向天线在靠近发送端的位置接收信号。

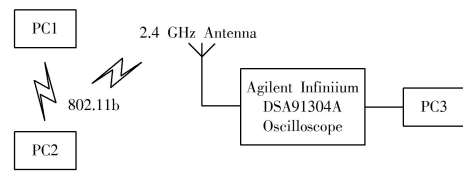


图 1 无线信号采集系统

本次实验中使用 Agilent Infiniium DSA91304A 高性能示波器(13 GHz 带宽,4 个模拟通道,每个通道的采样率均可达到 40 GSa/s)。

基于图 1 的无线信号采集系统,分别采集了 6 张不同品牌网卡的信号,每张网卡各采集 10 组数据。对采集到的无线网卡信号 $x(n)$ 首先进行希尔伯特变化,提取有瞬态部分的数据包络,如图 2 所示,从图中可以看出不同品牌网卡信号的瞬态前导响应段有较明显的差异。因此可以对无线信号的瞬态前导响应进行分形特征提取。

图 3 为瞬态信号的处理流程。无线网卡信号在经过包络提取、起点检测并截取一段包含噪声信号、前导响应信号和有用符号响应信号(总共 2 000 点,时间 200 ns,起点前 500 点,起点后 1 500 点)。

在图 3 中的起点检测处理过程,采用短时能量检测的方法。短时能量就是信号 $x^2(n)$ 经过冲激响应为 $h(n)$ 的数字滤波器后的结果,通常定义为:

$$E_n = \sum_{k=-\infty}^{\infty} [x(k)g(n-k)]^2 \tag{3}$$

其中: $h(n) = g^2(n)$ 是分析窗函数,常用的有矩形窗函数和汉明窗函数。本文中采用矩形窗函数对数据 $x(n)$ 求短时能量 E_n ,再根据能量检测阈值来确定瞬态起点。确定起点后,截取一段信号,并对其做分形特征提取。

首先提取信号的盒子维数,设置格子数为 2^{18} ,以保证其能覆盖全部的信号。采用 Matlab 编程,提取 6 张无线网卡的盒子维数,用描点的方式直观地描述出来,如图 4 所示。由图 4 可知,同一品牌网卡的盒子维数具有良好的聚类,并且不同品牌网卡的盒子维数具有一定的差异性。

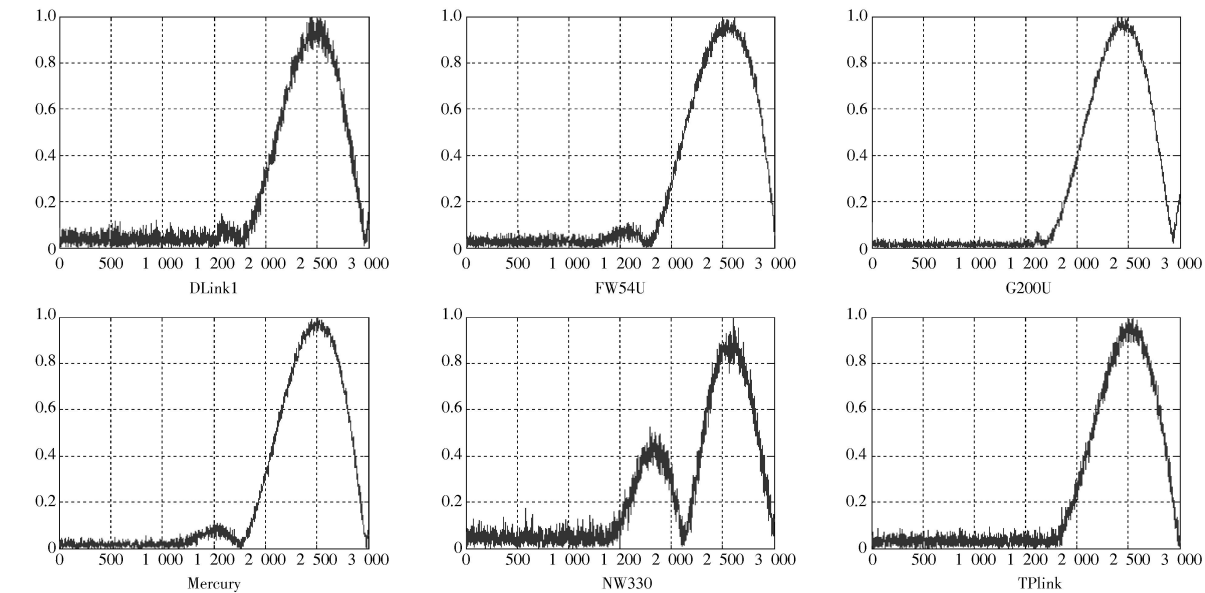


图2 无线信号瞬态部分数据包络



图3 瞬态信号处理流程

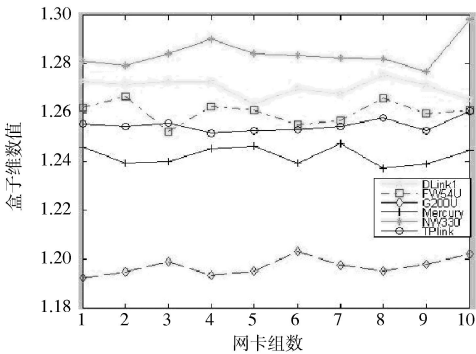


图4 6张不同品牌网卡的盒子维数

通过 Wolf 方法计算最大 Lyapunov 维数,首先得通过 C-C 算法确定延迟时间 τ 和嵌入维数 m ,以 TPlink 网卡信号为例,采用 Matlab 软件编程,做出 $Scor(t)$, $\overline{S(t)}$, $\Delta\overline{S(t)}$ 关于 t 的曲线图,如图 5 所示。

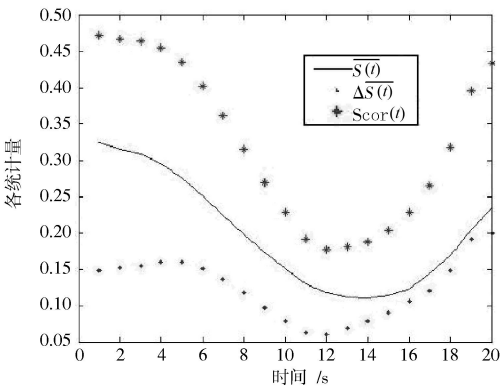


图5 TPlink 网卡信号 C-C 算法曲线图

延迟时间 τ 为 $\Delta\overline{S(t)}$ 的第一个极小值点对应的 t ,延迟时间窗 τ_w 为 $Scor(t)$ 最小值点对应的 t ,从图 5 可知, $\tau=12$, $\tau_w=12$,嵌入维数 $m=\tau_w/\tau+1$,计算得嵌入维数 $m=2$ 。确定延迟时间 τ 和嵌入维数 m 后,由 Wolf 方法计算 6 张不同品牌网卡信号的最大 Lyapunov 维数,并用描点画出来,如图 6 所示。

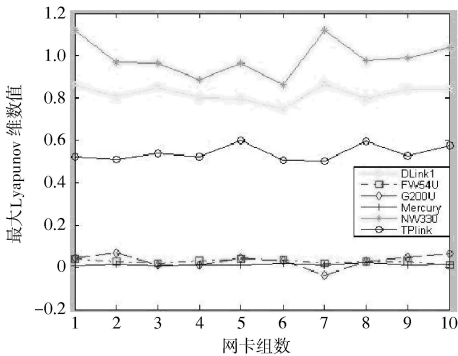


图6 6张不同品牌网卡信号的最大 Lyapunov 维数

从图 6 中可知,同一品牌网卡信号的最大 Lyapunov 维数仍然具有良好的聚类,不同品牌的网卡信号也具有一定的差异性。但从 FW54U、G200U、Mercury 这三种品牌网卡的最大 Lyapunov 维数来看,差异性已经很小。

3 结 语

认知无线电是一种利用频谱感知来提高频谱利用率的无线通信技术,模仿主用户攻击一直是困扰认知无线电安全问题的一大因素。本文提出一种基于分形维数的瞬态信号特征提取,为主用户信号识别提供特征参数,达到预防模仿主用户攻击的目的。文中通过采集无

(下转第 56 页)

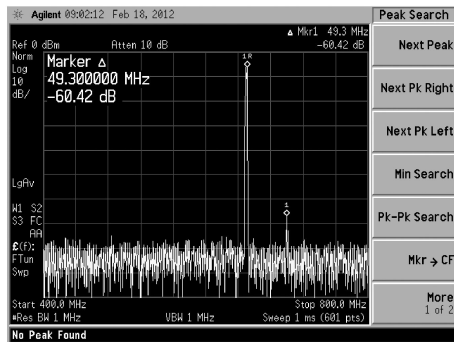


图6 输出信号功率谱图

3 结 语

输出频带窄和杂散抑制差一直是限制 DDS 发展的主要因素。本文提出了多路并行 DDS 原理,可大大拓展输出频率范围。设计的 FPGA+DAC 电路可实现输出频率在 400~700 MHz 范围,杂波抑制优于 50 dBc,频率分辨率小于 0.5 Hz。该 DDS 电路同时具有接口简单、使用灵活等优点,可用于在雷达、电子战领域的宽带细分力信号产生。

参 考 文 献

- [1] 温国谊.频率合成源的分析与实现技术的研究[D].西安:西安电子科技大学,2008.

作者简介:黄志林 男,1988年出生,湖北麻城人,在读硕士。主要研究方向为信号与信息处理。

(上接第53页)

线网卡信号,并对其进行一系列的处理,提取其盒子维数和最大 Lyapunov 维数。从结果来看,同一品牌网卡的维数具有良好的聚类,且不同品牌网卡之间具有一定的差异性。其中,作为识别器的特征输入参数,盒子维数的效果要优于最大 Lyapunov 维数。

参 考 文 献

- [1] Hong RONG. A Detection Method of Primary User Emulation Attacks in Cognitive Radio. Industry Observer [J]. [s.n.], 2012 (6): 55-60.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [3] MITOLA J, MAQUIRE G J. Cognitive radios: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [4] SANGIORGI D, WALKER D. The π -calculus: a theory of mo-

- [2] TIERNEY J, RADER C, GOLD B. A digital frequency synthesizer [J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1971, 19(1): 48-57.
- [3] 喻峰.基于FPGA的低相噪DDS的设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [4] 李明斌.直接数字频率合成的原理及频谱特征分析[J].电讯技术,1995,8(4):16-22.
- [5] 王晨.基于DDS的信号产生技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
- [6] 殷雷,金海军,李映雪,等.基于DDS的高精度函数信号发生器的研制[J].现代电子技术,2009,32(1):68-69.
- [7] 汪诗洋.一种扩展DDS输出带宽的新方法[J].舰船电子对抗,1999(2):26-27.
- [8] 吕捷.S波段低杂散高速跳频频综的设计[D].成都:电子科技大学,2007.
- [9] 刘科.高速任意波形合成关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2010.
- [10] Analog Devices. AD9912: 1 GPRS direct digital synthesizer with 14-bit DAC[EB/OL]. [2010-06]. <http://www.analog.com/en/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/ad9912/products/product.html>.
- [11] 牛耕,陈思宇,于继翔.基于DDS技术的正弦交流信号源的设计[J].现代电子技术,2012,35(3):52-56.
- [12] 曾菊容.基于FPGA和DDS技术的任意波形发生器设计[J].现代电子技术,2010,33(24):98-100.

bile processe [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

- [5] 孙霞,吴自勤,黄昀.分形原理及其应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2006.
- [6] 王东生,曹磊.混沌、分形及其应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1995.
- [7] WOLF A, SWIFT J B, SWINNEY H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series [J]. Physica, 1985, 16D: 285-317.
- [8] 王丹丹,王怀阳,李晓燕.健康人与心脏病人心电信号混沌特性比较研究[J].中国海洋大学学报,2006,36(5):197-200.
- [9] KIM H S, EYKHOLT R, SALAS J D. Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows[J]. Physica D, 1999, 127 (1/2): 48-60.
- [10] 陈国华,盛昭瀚.基于Lyapunov指数的混沌时间序列识别[J].系统工程理论方法应用,2003,12(4):317-320.
- [11] 王兴元,顾树生.心电动态生理及病理信息的非线性动力学研究[J].中国生物医学工程学报,2000,19(4):397-403.